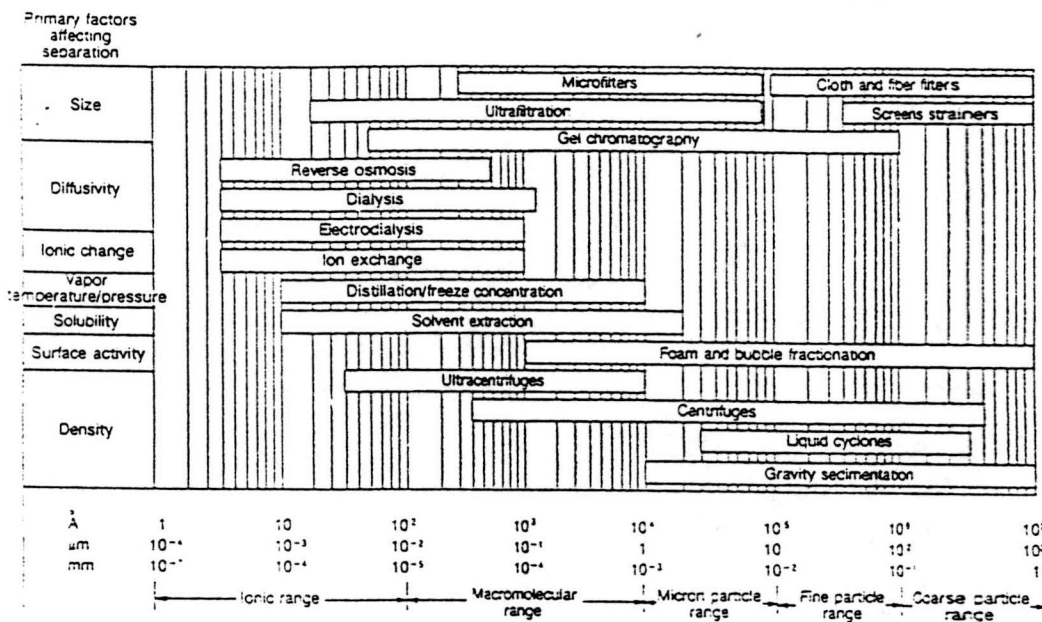


บทที่ 2

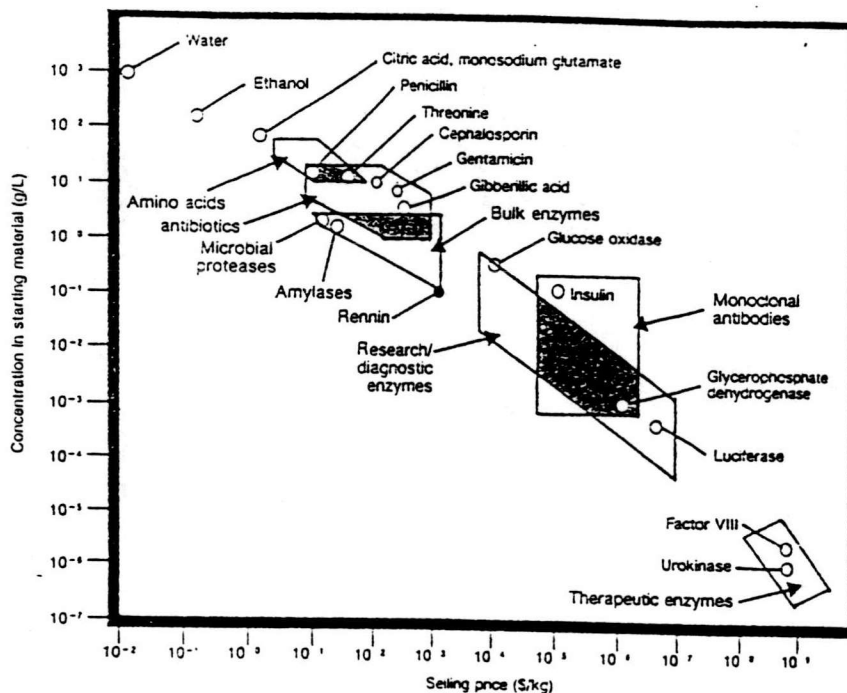
การสำรวจเอกสาร

กระบวนการแยกสาร (1 , 2)

กระบวนการแยกสารเป็นกระบวนการที่สำคัญใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท วิธีการแยกสารแบบต่างๆ แสดงในรูป 2.1 การแยกสารหรือโมเลกุลสามารถแบ่งได้ตามคุณลักษณะของสารหรือโมเลกุลชนิดนั้น เช่น การสกัดเป็นการแยกสารโดยอาศัยความแตกต่างในการละลายของสารหรือโมเลกุลในตัวกลางแต่ละชนิด, การตกตะกอนและการปั่นเหวี่ยงเป็นการแยกสารโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของสารกับตัวกลาง ซึ่งความหนาแน่นของสารต้องมามีค่ามากกว่าความหนาแน่นของตัวกลาง, การกรองเป็นการแยกสารโดยอาศัยขนาดของสาร เป็นต้น การกรองถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เพื่อใช้แทนที่กระบวนการแยกสารด้วยวิธีอื่น ๆ หรือเพื่อใช้ในการลดต้นทุนการผลิต การกรองสามารถแบ่งได้หลายชนิด เช่น การกรองด้วยผ้าและเส้นใย, ไมโครฟิลเตรชัน, อุลตราฟิลเตรชัน เป็นต้น การกรองด้วยวิธีไมโครฟิลเตรชันและอุลตราฟิลเตรชันได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ไมโครฟิลเตรชันในการกรองไวน์หรือน้ำผลไม้แทนการเติมสารเพื่อให้สิ่งเจือปนเกิดการตกตะกอน ใช้อุลตราฟิลเตรชันในการแยกโปรตีนหรือแอนติบอดีจากเซลล์ ซึ่งวิธีนี้ทำให้สารโปรตีนไม่เสียสมบัติ เป็นต้น สารชีวโมเลกุลส่วนใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ได้จากกระบวนการหมักซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากเซลล์ สารชีวโมเลกุลส่วนใหญ่ใช้ประยุกต์ทางการแพทย์ หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อินซูลิน, เพคตินเนส, แอลฟาอะไมเลส เป็นต้น สารชีวโมเลกุลเป็นสารที่มีราคาแพง ในตารางที่ 2.1 แสดงการประยุกต์ใช้การกรองในอุตสาหกรรมอาหาร



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการแยกสารด้วยวิธีการต่าง ๆ (1)



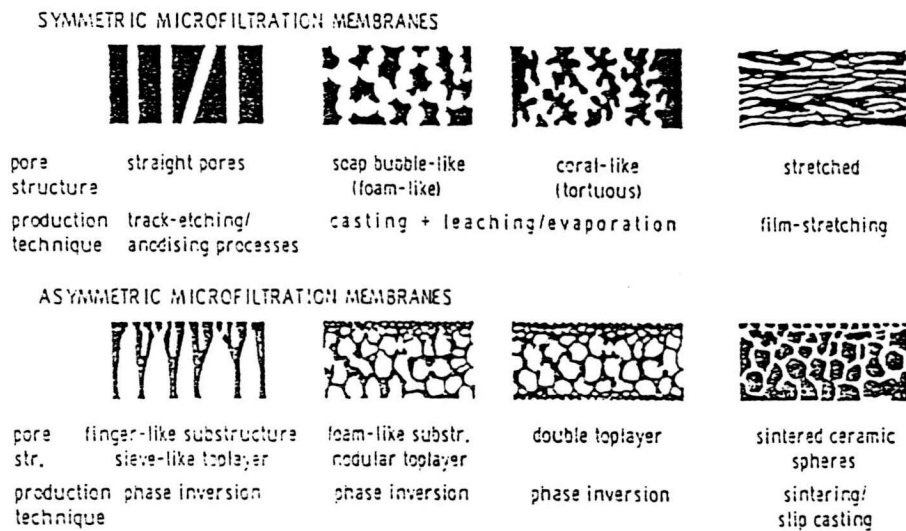
รูปที่ 2.2 แสดงราคาของสารชีวโมเลกุลชนิดต่าง ๆ (1)

ตารางที่ 2.1 แสดงการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองในอุตสาหกรรมอาหาร (2)

Industry	Feed	Concentrate	Permeate	Aim/Target	References
Dairy	Milk	fat, casein bacteria	whey milk	concentration cold pasteurization	40,51,54,56 7,13,27,32,40
	Whey	lipoproteins bacteria fat globules	clarified whey whey whey	defatting and clarification cold pasteurization defatting	14,21,25,33 34,41
	Brine Concentr. brine	bacteria colloids	brine brine	cold pasteurization clarification	35 unpubl. results
Vegetables	Vegetable juice	fibres	(poly) saccharides	concentration	12
	Mushroom water	Aromates	water	aroma concentration	10
Beverage	wine/vinegar	yeast/bacteria colloids mold products lees	wine wine wine wine	prevention of secondary fermentation cold stabilization removal of metabolites 'rest' wine recovery sterile filtration	17,19,20, 23,31,44
	beer cider	yeast/bacteria colloids/ proteins	beer beer	rest beer recovery fining clarification	16,17,29,36,37 44,45,47
	grapes, pears, pineapples, cranberries, lemon juice, apple juice, citrus-peel- extracts	fibres colloids, 'cloud' colloids, un- solubles	clear juice	clarification concentration of "clouding agent"	17,18,47,55 46
Egg	egg white		lysozyme	lysozyme recovery	30
Biopolymers	gelatin	gelatin		clarification	48
Sugar	sugar streams	unsoluble solids	sugar steam	suspensoid-free-sugar streams	38
Other	pickle brine	bacteria	process water	reuse process water by cold sterilization	pers. comm.
	mineral water	colloids	pure water	clarification	pers. comm.

เยื่อแผ่น

เยื่อแผ่นได้ถูกนำมาใช้ในงานไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน ลักษณะของเยื่อแผ่นแบ่งได้เป็นสองแบบคือเยื่อแผ่นสมมาตร (Symmetric membrane) และเยื่อแผ่นอสมมาตร (Asymmetric membrane) ดังแสดงในรูป 2.3 เยื่อแผ่นสมมาตรเป็นเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนขนาดเดียวในเยื่อแผ่น ในขณะที่เยื่อแผ่นอสมมาตรประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นซึ่งเป็นชั้นที่มีความหนาน้อยและมีรูพรุนขนาดเล็ก และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับซึ่งเป็นชั้นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่และเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่เยื่อแผ่น เยื่อแผ่นอสมมาตรเป็นที่นิยมใช้กันน้อยกว่าหลาย เพราะ เยื่อแผ่นสมมาตรเมื่อใช้กรองสารจะเกิดการอุดตันได้ง่ายกว่าเยื่อแผ่นอสมมาตร อีกทั้งเยื่อแผ่นอสมมาตรมีความต้านทานต่อการกรองต่ำกว่าเยื่อแผ่นสมมาตร



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของเยื่อแผ่นสมมาตรและเยื่อแผ่นอสมมาตร (2)

ชนิดของเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันสามารถแบ่งได้ตาม

ชนิดของสารที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. เยื่อแผ่นพอลิเมอร์ เป็นเยื่อแผ่นที่ผลิตได้จากสารพอลิเมอร์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ , พอลิโพรไพลีน , เซลลูโลสอะซิเตด เป็นต้น ในการผลิตเยื่อแผ่นชนิดนี้สามารถควบคุมให้มีขนาดรูพรุนได้ตามต้องการ ราคาถูก และสามารถประยุกต์ใช้ในงานได้หลายประเภท เช่น ใช้ในกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำทะเล , การแยกตัวทำละลายออกจากสารละลาย เป็นต้น แต่เยื่อแผ่นชนิดนี้มีข้อจำกัดคือ สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำและไม่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ชนิดเยื่อแผ่นพอลิเมอร์แสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ (2)

โรงงานผู้ผลิต	ชื่อทางการค้า	ขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)	เยื่อแผ่น /ตัวรองรับ	วิธีการผลิต
A/G Technology	-	0.1 - 5.0	polysulfone	การจุ่ม-การตกตะกอน
AKZO/ENKA	Accurel	0.1 - 0.65	polypropylene	การตกตะกอนด้วยความร้อน
	Microdyn	0.1 - 0.4	nylon-6	
AMICON		0.1	polysulfone cellulose acetate fluoropolymer	เทคนิคการเปลี่ยนเฟส
Berghoff	-	2.0 - 5.0	polyethylene	เทคนิคการเปลี่ยนเฟส
Celanese	Celgrad	0.02 - 0.4	polypropylene	stretching
DDS	-	0.1 - 5.0	polysulfone	การจุ่ม-การตกตะกอน
		0.1 - 5.0	fluoropolymer	การระเหย-การตกตะกอน
Domnick Hunter	Abcor	0.1 - 5.0	polysulfone	การจุ่ม-การตกตะกอน
Kururay	-	0.01 - 0.5	polyvinyl alcohol	การจุ่ม-การตกตะกอน

2. เยื่อแผ่นเซรามิก เป็นเยื่อแผ่นที่ผลิตได้จากสารเซรามิก สารเซรามิกที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นแบ่งได้เป็น 9 ชนิด คือ อะลูมินา, เซอร์โคเนีย, ไทเทเนีย, โบโรซิลิเกต, คอรัเดีย

ไรท์, มัลไลท์, ซิลิกา, ซิลิกอนคาร์ไบด์ และ ซิลิกอนไนไตรด์ เยื่อแผ่นเซรามิกได้เริ่มใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากทนต่อความดัน, ความร้อน, ทนต่อสารเคมี แต่มีข้อเสียคือ ในกระบวนการผลิตควบคุมขนาดรูพรุนได้ยาก ราคาแพง ไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลัน ตัวอย่างของเยื่อแผ่นเซรามิกแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดเยื่อแผ่นเซรามิก (2)

โรงงานผู้ผลิต	ชื่อทางการค้า	ขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)	เยื่อแผ่น /ตัวรองรับ	วิธีการผลิต
Alcan /Anotac	Anopore	0.025 - 0.2	γ - Al_2O_3	การออกซิไดซ์ที่ขั้วลบ
Alcoa / SCT	Ceraver /Membralox	0.2 - 5.0 0.1	α - Al_2O_3 ZrO_2/α - Al_2O_3	การซินเทอร์/ การเทแบบ
Asahi Glass	MPG	0.2 - 3.0	แก้ว	การชะเฟสละลาย
Carre	Ucarsep	0.1	ZrO_2/C	การสร้างจากสารแขวน ลอย
Le Carbone- Lorraine F6000	-	0.2 - 1.0	คาร์บอน	-
Ceram Filter	-	0.15 - 8.0	SiC	การซินเทอร์/ การเทแบบ
Millipore/Norton	Ceraflo	0.2 - 1.0	α - Al_2O_3	การซินเทอร์/ การเทแบบ
NKG	-	0.2	SiC	การซินเทอร์/ การเทแบบ
Rhone Poulenc	Carbosep	0.6 - 0.14	ZrO_2/C	การสร้างจากสารแขวน ลอย
Schott	-	0.05 - 0.3	แก้ว	การชะเฟสละลาย

3. เยื่อโลหะ เยื่อแผ่นชนิดนี้ผลิตจากการสแกนเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยสแตนเลส ข้อดีของเยื่อโลหะ คือ มีอายุการใช้งานนาน มีความแข็งแรงสูง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เน้นกระบวนการผลิตเยื่อแผ่นชนิดเซรามิกตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้นในการผลิตตัวรองรับจนถึงกระบวนการเคลือบเยื่อแผ่น ขั้นตอนการผลิตเยื่อแผ่นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ คือ การเตรียมตัวรองรับเยื่อแผ่น, การเตรียมเยื่อแผ่น และการทดสอบการกรองของเยื่อแผ่น โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเซรามิกจะประกอบไปด้วยชั้นที่เป็นตัวรองรับ และชั้นเยื่อแผ่น ตัวรองรับทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เยื่อแผ่น โดยขนาดรูพรุนของตัวรองรับต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น ในขณะที่เยื่อแผ่นทำหน้าที่กรองสาร ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นจึงควรมีขนาดเล็กกว่าขนาดของสารที่ต้องการแยก การเตรียมตัวรองรับสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น การเทแบบ, การรีด, การอัด เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มุ่งเน้นการเตรียมตัวรองรับด้วยวิธีการเทแบบ เนื่องจากวิธีการเทแบบไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์มากนัก เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก ส่วนการเตรียมเยื่อแผ่นสามารถเตรียมได้โดยการนำสารละลายไฮดรอกไซด์เคลือบลงบนตัวรองรับ จากนั้นนำไปเผาเพื่อให้เยื่อแผ่นมีความแข็งแรง สุดท้ายจึงนำเยื่อแผ่นที่เตรียมได้ไปทดสอบการกรอง

การเตรียมตัวรองรับ

การเตรียมตัวรองรับโดยวิธีการเทแบบทำโดยนำน้ำสลิบไปเทลงในแบบพิมพ์ จากนั้นรอนกระที่ให้ความหนาของชิ้นงานตามที่ต้องการ จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปขึ้นเทอร์ น้ำสลิบประกอบด้วยเนื้อเซรามิก น้ำ และสารเติมแต่ง เนื้อเซรามิกที่ใช้คือแอลฟาอะลูมินา ในส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมตัวรองรับและสารเติมแต่งที่ใช้

อะลูมินา (3)

อะลูมินาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมตัวรองรับ อะลูมินาทนต่อสารเคมีและเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่าย มีสูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 น้ำหนักโมเลกุล 101.94 ความถ่วงจำเพาะ 3.4 - 4.0 มีโครงสร้างได้หลายรูป แอลฟาอะลูมินา (α -Alumina) มีความหนาแน่นสูง ไม่ละลายน้ำ มีจุด

หลอมเหลวที่ 2040 - 2050 °ซ ในการทดลองนี้ใช้แอลฟาอะลูมินาชนิดแคลไซต์ อะลูมินาแคลไซต์ได้จากการนำอะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์มาเผาที่อุณหภูมิ 1200 °ซ

การขึ้นรูปด้วยวิธีการเทแบบ (4 , 5 , 6)

วิธีการเทแบบนี้เป็นการเทน้ำสลึงลงในแบบพิมพ์ ในขณะที่แบบพิมพ์ลุดขึ้นมาออกจากน้ำสลึงเรื่อย ๆ ชิ้นงานจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อได้ความหนาตามต้องการแล้ว น้ำสลึงที่เหลือจะถูกเทออกจากแบบพิมพ์ ชิ้นงานที่ได้ยังคงมีน้ำอยู่ภายในเนื้อชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานแห้งจะทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงาน เป็นสาเหตุให้ชิ้นงานร่อนออกจากแบบ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเผาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

น้ำสลึงประกอบด้วยเนื้อเซรามิกที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลาง โดยทั่วไปตัวกลางที่ใช้คือน้ำ ปริมาณน้ำในน้ำสลึงควรมีเปอร์เซ็นต์ต่ำ และน้ำสลึงต้องมีการไหลตัวที่ดี การทำให้น้ำสลึงมีการไหลตัวที่ดีจำเป็นต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงสมบัติให้เนื้อเซรามิกมีการกระจายตัวที่ดี การเตรียมน้ำสลึงจะต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญสามส่วนคือ

1. เนื้อเซรามิก น้ำสลึงส่วนใหญ่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจนกระทั่งถึง 10 ไมโครเมตร อนุภาคที่มีขนาดโตกว่า 20 ไมโครเมตรควรมีปริมาณน้อย และขนาดอนุภาคเฉลี่ยควรมีขนาด 1 - 5 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคในช่วงดังกล่าวจะมีแรงที่กระทำต่ออนุภาคที่บริเวณผิวมากกว่าแรงเนื่องจากน้ำหนัก แต่ถ้าอนุภาคที่ใช้มีขนาดละเอียดมากจะทำให้การควบคุมพฤติกรรมกรรมการไหลตัวของน้ำสลึงเป็นไปได้ยาก
2. ตัวกลาง โทนงานเซรามิกตัวกลางที่นิยมใช้คือน้ำ เพราะน้ำเป็นตัวกลางที่มีราคาถูกหาได้ง่ายและไม่เป็นพิษ
3. สารเติมแต่ง สามารถแบ่งได้หลายชนิด ตามหน้าที่ของสารเติมแต่งซึ่งแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงหน้าที่ของสารเติมแต่ง (5)

สารเติมแต่ง	หน้าที่
ตัวประสาน (Binder)	เพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผา
สารเพิ่มความเหนียว (Plasticizer)	เพื่อปรับความเหนียว เพิ่มความยืดหยุ่นของตัวประสาน ควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง
สารช่วยกระจายตัว (Deflocculant)	ช่วยกระจายตัวของอนุภาค
สารลดผิว (Wetting agent)	ลดแรงตึงผิว
สารลดฟอง (Antifoam agent)	ป้องกันการเกิดฟอง

3.1 ตัวประสาน ตัวประสานที่เพิ่มเติมลงในน้ำสลิปเพื่อให้ชิ้นงานก่อนเผามีความแข็งแรง , ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและการเก็บรักษา สำหรับตัวประสานที่เหมาะสมกับกระบวนการเทแบบควรมีสมบัติดังนี้ สามารถผสมกับน้ำสลิปได้ดี , ตัวกลางสามารถแพร่ผ่านได้ , สร้างความหล่อลื่นระหว่างอนุภาค , ง่ายต่อการกำจัดออกจากชิ้นงาน , มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อให้เกิดความแข็งแรง เป็นต้น ตัวประสานที่นิยมใช้ในกระบวนการทางเซรามิกแสดงในตารางที่

2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงตัวประสานที่นิยมใช้ในงานเซรามิก (4)

ตัวประสานอินทรีย์	ตัวประสานอนินทรีย์
Polyvinyl alcohol (PVA)	ดิน (Clays)
Waxes	Bentonites
Celluloses	Mg-Al silicates
Dextrines	Soluble silicates
Thermoplastic resins	Organic silicates
Thermosetting resins	Colloidal silica
Alginates	Colloidal alumina
Lignins	Aluminates
Rubbers	Phosphates
Gums	Borophosphates
Starches	
Gelatins	
Albumins	
Proteins	
Acrylics	

3.2 สารเพิ่มความเหนียว การเติมสารเพิ่มความเหนียวลงในน้ำสลิปที่เติมตัวประสาน ทำให้ตัวประสานมีความยึดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงของตัวประสานลดลง การเติมสารเพิ่มความเหนียวทำให้เนื้อเซรามิกสามารถอัดตัวได้ดีขึ้น สำหรับตัวอย่างสารเพิ่มความเหนียวได้แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงสารเพิ่มความหนืดที่นิยมใช้ในงานเซรามิก (4)

สารเพิ่มความหนืด	จุดหลอมเหลว (°ซ)	จุดเดือด (°ซ)	น้ำหนักโมเลกุล
น้ำ	0	100	18
Ethylene glycol	-13	197	62
Diethylene glycol	-8	245	106
Triethylene glycol	-7	288	150
Tetraethylene glycol	-5	327	194
Polyethylene glycol	-10	>330	300
Glycerol	18	290	92
Dibuthyl phthalate	-	340	278
Dimethyl phthalate	1	284	194

3.3 สารช่วยกระจายตัว การกระจายตัวของเนื้อเซรามิกสามารถทำได้โดยการเติมสารช่วยกระจายตัวลงในน้ำสลิป สารช่วยกระจายตัวส่วนใหญ่เป็นสารพอลิเมอร์ พอลิเมอร์นี้ควรมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงจะเกิดการกระจายตัวที่ดี ตัวอย่างของสารช่วยกระจายตัวแสดงในตารางที่ 2.7

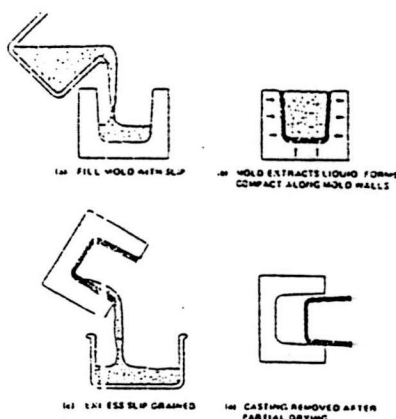
3.4 สารลดผิว ได้แก่พวกสารลดแรงตึงผิว เช่น Sodium stearate , Ethoxylated nonylphenol , Sodium disopropylnaphtalene sulfonate เป็นต้น ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ประมาณ 0.01 - 0.2 เปอร์เซ็นต์ สารลดแรงตึงผิวทำให้การดูดซับน้ำที่ผิวอนุภาคดีขึ้น

3.5 สารลดฟอง ได้แก่ Fluorocarbons , Dimethylsilicones , แอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง , กลีเซอรอล , Tributyl phosphate เป็นต้น

ตารางที่ 2.7 แสดงสารช่วยกระจายตัวที่นิยมใช้ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (4)

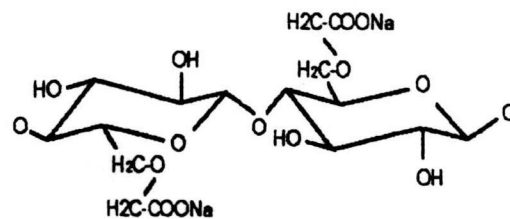
สารช่วยกระจายตัวชนิดอนินทรีย์	สารช่วยกระจายตัวชนิดอินทรีย์
Sodium carbonate	Sodium polyacrylate
Sodium silicate	Ammonium polyacrylate
Sodium borate	Sodium citrate
Tetrasodium pyrophosphate	Sodium succinate
	Sodium ttrate
	Sodium polysulfonate
	Ammonium citrate

การขึ้นรูปด้วยวิธีการเทแบบสามารถแบ่งได้หลายอย่าง เช่น การเทแบบโดยมีการเทน้ำสลิปที่เหลือทิ้ง (Drain casting) , การเทแบบโดยน้ำสลิปแข็งตัวอยู่ในแบบ (Solid casting) , การเทแบบภายใต้ความดันสุญญากาศ (Vacuum casting) , การเทแบบด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifugal casting) สำหรับกระบวนการเทแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ คือ การเทแบบโดยการเทน้ำสลิปที่เหลือทิ้ง ดังที่แสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการขึ้นรูปด้วยวิธีการเทแบบโดยการเทน้ำสลิปที่เหลือทิ้ง (5)

ในปี ค.ศ. 1990 Ruys และ Sorrell (9) ได้เตรียมอะลูมินาสำหรับใช้เป็นควอซิเบิลที่มีความหนาน้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตร , เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.5 มิลลิเมตร เพื่อใช้การวิเคราะห์ DTA คณะวิจัยได้ใช้ตัวประสานและสารช่วยกระจายตัวชนิดเดียวกัน คือ โซเดียมคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethylcellulose , SCMC) ทั้งนี้เมื่อ SCMC ถูกดูดซับไว้ที่ผิวอะลูมินา จะทำให้เกิดการสร้างฟิล์มระหว่างพอลิเมอร์และน้ำ เป็นการลดแรงกระทำระหว่างอนุภาคและเมื่อ SCMC ละลายในน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ทำให้ที่ผิวอะลูมินาเกิดเป็นประจุลบ โครงสร้างของ SCMC แสดงได้ในรูปที่ 2.5 ในงานวิจัยได้เตรียมน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็ง 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมเติม MgO 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยซินเทอร์ อะลูมินาที่ใช้ในการวิจัยคือ AES-HPS ซึ่งมีขนาดอนุภาค 0.4 ไมโครเมตร จากการวิจัยพบว่าปริมาณของ SCMC ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเมื่อซินเทอร์ที่ 1600 °ซ นาน 2 ชั่วโมง พบว่าหลังการซินเทอร์ขึ้นงานมีความหนาแน่นเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นทางทฤษฎี แต่จากการวิจัยพบว่า ชีงงานหลังจากการซินเทอร์มีการปนเปื้อนของแคลเซียมที่ผิวหน้าชีงงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่ติดกับแบบพิมพ์



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของโซเดียมคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (9)

ในปี ค.ศ. 1992 Smith และ Haber (10) ได้ศึกษาการปรับปรุงน้ำสลิปอะลูมินา ด้วยการปรับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค อะลูมินาที่ใช้มี 4 ชนิด คือ ขนาดหยาบมากที่สุด (F-400) , ขนาดหยาบ (A-2750) , ขนาดกลาง (A-14) และขนาดละเอียด (A-16) โดยใช้สูตรการปรับปรุงน้ำสลิปดังนี้

$$\frac{\text{CPFT}}{100} = \frac{(D^n - D_s^n)}{(D_l^n - D_s^n)}$$

เมื่อ CPFT เป็นเปอร์เซ็นต์สะสมละเอียดกว่า (Cumulative percent finer than)

D_l เป็นขนาดอนุภาคใหญ่สุด

D_s เป็นขนาดอนุภาคเล็กสุด

D เป็นขนาดอนุภาคที่ต้องการ

n เป็นค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.37

ในการวิจัยได้ปรับการกระจายขนาดอนุภาคตั้งแต่ 44 ถึง 0.1 ไมโครเมตร โดยการผสมอะลูมินาทั้งสี่ชนิดตามส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2.7 น้ำสลิปที่เตรียมขึ้นมีปริมาณของแข็งเป็น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้เตตระโซเดียมฟอสเฟต (Tetrasodium phosphate) เป็นสารช่วยกระจายตัวและวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสลิปได้เท่ากับ 10.1 ± 0.1 พบว่าองค์ประกอบของน้ำสลิปชนิดไบนารี (Binary) ให้การกระจายของขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดและให้ความหนืดต่ำสุดที่ 196 เซนติพอยส์ ชีงงานก่อนเผามีความหนาแน่น 2.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชีงงานก่อนเผามีการกระจายตัวของรูพรุนแบบสองโหมด คือ ที่ 1 และ 0.1 ไมโครเมตร

ตารางที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบของน้ำสลิป (10)

น้ำสลิป	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอะลูมินา			
	A-14	A-16	A-2750	F-400
Binary	85	15	0	0
Ternary I	43	21	0	0
Ternary II	37	22	0	41
Ternary I D ₁₀ ^{eff}	38	37	25	0
Ternary I D ₁₅ ^{eff}	40	27	29	0
Ternary I D ₂₀ ^{eff}	36	22	37	0

ในปี ค.ศ. 1994 Smith และคณะ (11) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกรองและโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้ก่อนขึ้นเทอร์ที่มีภาวะการกระจายตัวที่แตกต่างกัน โดยใช้ น้ำสลิปสองชุดที่มีความหนืด 500 และ 60 เซนติพอยส์ โดยแต่ละชุดมีปริมาตรของแข็ง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่ากัน ใช้เตตระโซเดียมฟอสเฟตเป็นสารช่วยกระจายตัว ผลจากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยน้ำสลิปที่มีความหนืดสูงกว่า (500 เซนติพอยส์) ให้การกระจายของรูพรุนสองโหมด สำหรับชิ้นงานที่ได้จากการหล่อน้ำสลิปที่มีความหนืดต่ำ (60 เซนติพอยส์ , เกิดการกระจายตัวได้ดี) ให้การกระจายของรูพรุนที่มีขนาดเดียวและความหนาของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อจะมีผนังบางกว่าชิ้นงานที่ได้จากการหล่อน้ำสลิปที่มีความหนืดสูง

ในปี ค.ศ. 1957 Cutler และคณะ (12) ได้ขึ้นเทอร์อะลูมินาที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยใช้อะลูมินาขนาดเล็กและใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ หรือ ไทเทเนียมไดออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์เป็นสารช่วยขึ้นเทอร์ ชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นเทอร์มีความหนาแน่น 96 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ออกไซด์ร่วมกัน 2 ตัว สามารถขึ้นเทอร์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้ออกไซด์เพียงตัวเดียว เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ , คอปเปอร์ออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์เป็นตัวเร่งให้เกิดการรวมตัวของอะลูมินา

ในปี ค.ศ. 1991 Ling และคณะ (13) ได้ทำการขึ้นเทอร์อะลูมินาที่ 1070 °ซ นาน 1 ชั่วโมง โดยใช้สารช่วยขึ้นเทอร์ที่ประกอบไปด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.9 เปอร์เซ็นต์โมล , คอปเปอร์ออกไซด์ 0.9 เปอร์เซ็นต์โมล, โบรอนออกไซด์ 0.1 เปอร์เซ็นต์โมลและ แมกนีเซียมออกไซด์ 0.1 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังจากการขึ้นเทอร์เป็น 99 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นทางทฤษฎี การเพิ่มเติมโบรอนออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ เพื่อทำหน้าที่ยับยั้งการโตของผลึกที่ผิดปกติเนื่องจากการเติมไทเทเนียมออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ถ้าเพิ่มระยะเวลาในการขึ้นเทอร์หรือใช้อุณหภูมิสูงขึ้น สารช่วยขึ้นเทอร์จะทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นตามแนวยาวและชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 1994 Nonko และคณะ (14) ได้ผลิตตัวกรองเซรามิกชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งขึ้นรูปโดยวิธีการอัดและให้ความร้อนทุกทิศทาง (Hot isostatic pressing, HIP) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 0.3 ไมโครเมตร จากการทดลองพบว่าตัวกรองที่ได้มีขนาดรูพรุน 0.1 ไมโครเมตร การขึ้นรูปโดยวิธี HIP ทำให้ตัวกรองมีความพรุนสูงและมีความแข็งแรง เนื่องจากในระหว่างการขึ้นรูปจะมีการอัดแก๊สความดันสูงซึ่งเป็นการป้องกันการหดตัวของรูพรุนเปิดและทำให้อนุภาคมีการเชื่อมติดกันมากขึ้น ทั้งนี้เพราะการใช้แก๊สที่ความดัน

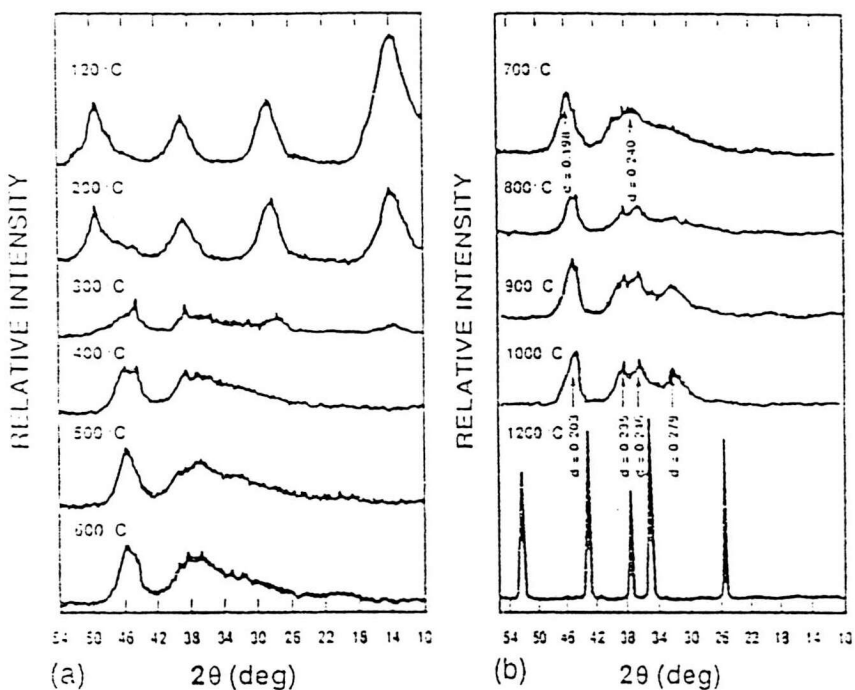
สูงทำให้เกิดการแพร่ที่ผิวสูง และการแพร่ที่ผิวทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างอนุภาค ซึ่งกลไกการขึ้นเทอร์ซันคนี้ทำให้ไม่เกิดการหดตัวของชิ้นงาน

การเตรียมเยื่อแผ่น

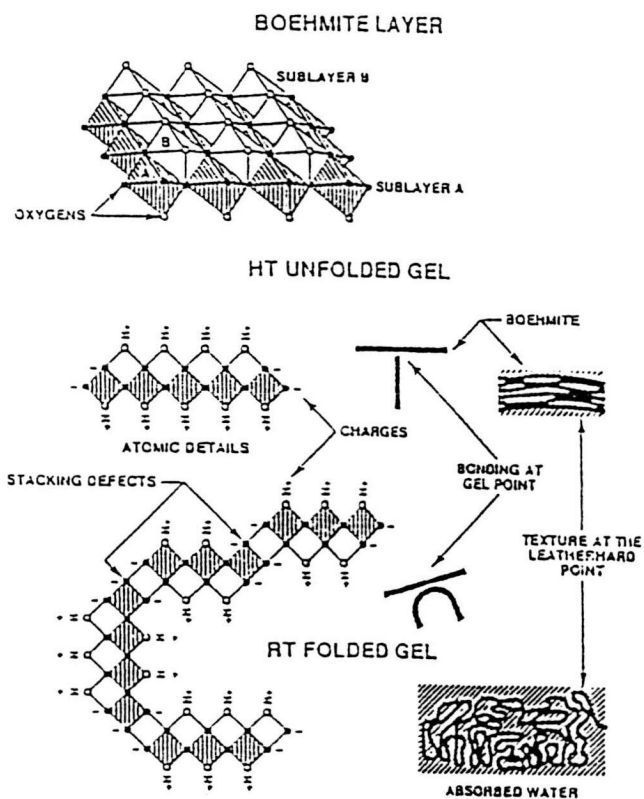
ชั้นเยื่อแผ่นเตรียมได้จากการเคลือบโซลของโบรไมต์ (Boehmite) บนตัวรองรับหลังจากนั้นนำไปเผา เพื่อเปลี่ยนโบรไมต์ให้เป็นแกมมาอะลูมินา แกมมาอะลูมินาจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่น

โบรไมต์ (15)

โบรไมต์หรืออะลูมินาโมโนไฮดรต มีสูตรโมเลกุลคือ $AlOOH$ โบรไมต์สามารถเตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจลโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลคอกไซด์และน้ำ โบรไมต์มี 2 รูปคือ โบรไมต์รูปสัณฐาน ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น $\gamma-AlOOH$ และมีโครงสร้างเป็นผลึก ในขณะที่ โบรไมต์รูปอสัณฐานหรือโบรไมต์เทียมเป็นโบรไมต์ที่มีความเป็นผลึกน้อย มีน้ำในผลึกเป็นอัตราส่วน คือ $1.7H_2O/Al$ โบรไมต์ทั้งสองรูปแบบเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการกำจัดโมเลกุลน้ำและมีการจัดเรียงโมเลกุลใหม่ โบรไมต์เปลี่ยนเฟสเป็น $\gamma-Al_2O_3$ ที่อุณหภูมิประมาณ $400 - 500^{\circ}C$ (ในรูปที่ 2.6) และหลังจากเผาจนถึงอุณหภูมิ $1200^{\circ}C$ จะเกิดเป็นแอลฟาอะลูมินา ($\alpha-Al_2O_3$) โดยทั่วไปในโครงสร้างของโบรไมต์ ออกซิเจนมีการจัดเรียงตัวแบบทรงแปดเหลี่ยมที่เสียรูป (Distorted octahedral) รอบ ๆ อะตอมอะลูมิเนียม ซึ่งจัดเรียงตัวเป็นชั้นขนาน โดยมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่างชั้น ดังแสดงในรูป 2.7



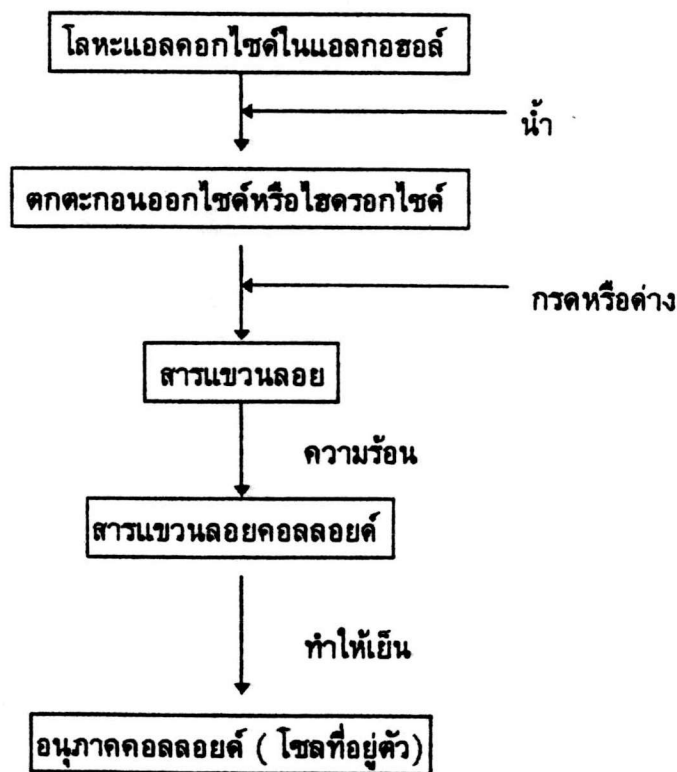
รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของโบรไมต์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (15)



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของโบรไมต์ (15)

กระบวนการโซล-เจล (16)

กระบวนการโซล-เจลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ โซลพอลิเมอร์ (polymeric sol) และ โซลอนุภาค (particulate sol) ในการเตรียมเยื่อแผ่นส่วนใหญ่ใช้วิธีโซลอนุภาค ขั้นตอนในการเตรียมโซลอนุภาคสามารถสรุปได้ในรูปที่ 2.8 เริ่มจากการไฮโดรไลซิสแอลคอกไซด์ ซึ่งจะได้ตะกอนของไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์ของโลหะ ตะกอนไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์ของโลหะที่ได้จะเกิดการแขวนลอยได้โซลที่อยู่ตัว การแขวนลอยทำได้โดยการเติมกรดหรือด่างลงในสารละลายเพื่อทำให้เกิดชั้นของประจุที่ผิวอนุภาคโซล ในตารางที่ 2.7 แสดงสารประกอบแอลคอกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการเตรียมโซลอนุภาค (16)

ตารางที่ 2.9 แสดงโลหะแอลคอกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโซล-เจล (17)

ชื่ออนวาท	$M(OR)_n$	ชื่อทางเคมี
Si	$Si(OCH_3)_4$	Tetramethylorthosilicate
	$Si(OC_2H_5)_4$	Tetraethylorthosilicate
Al	$Al(O\text{-}iso\text{-}C_3H_7)_3$	Aluminum isopropoxide
	$Al(O\text{-}sec\text{-}C_4H_9)_3$	Aluminum secondary butoxide
Ti	$Ti(O\text{-}C_2H_5)_4$	Titanium ethoxide
	$Ti(O\text{-}iso\text{-}C_3H_7)_4$	Titanium tetraisopropoxide
	$Ti(O\text{-}C_4H_9)_4$	Titanium tetrabutoxide
	$Ti(O\text{-}C_5H_7)_4$	Titanium tetramyloxide
B	$B(OCH_3)_3$	Trimethylborate
Ge	$Ge(O\text{-}C_2H_5)_4$	Germanium ethoxide
Zr	$Zr(O\text{-}iso\text{-}C_3H_7)_4$	Zirconium isopropoxide
	$Zr(O\text{-}C_4H_9)_4$	Zirconium tetratertiary butoxide
Y	$Y(O\text{-}C_2H_5)_3$	Yttrium ethoxide
Ca	$Ca(O\text{-}C_2H_5)_2$	Calcium ethoxide

กระบวนการเตรียมเยื่อแผ่น (16)

การเตรียมเยื่อแผ่นเป็นการเคลือบโซลบนผิวของตัวรองรับ วิธีการเตรียมเยื่อแผ่นที่นิยมใช้ คือ วิธีหล่อสลิต (slipcasting) , วิธีการกรอง , วิธีการเคลือบ เป็นต้น

1. วิธีหล่อสลิต เป็นการจุ่มตัวรองรับลงในสารละลายโซล ทำให้เกิดการสร้างเยื่อแผ่นขึ้นโดยอาศัยแรงแคปิลลารี การสร้างเยื่อแผ่นโดยวิธีนี้ สารละลายโซลควรมีความหนืดประมาณ 0.1 - 1 พอยส์ เพราะ ถ้าสารละลายโซลมีความหนืดมากกว่า 1 พอยส์ ความหนาของเยื่อแผ่นที่เตรียมได้จะไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าสารละลายโซลมีความหนืดต่ำกว่า 0.1 พอยส์ โซลจะเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับทำให้เกิดการอุดตันในตัวรองรับ

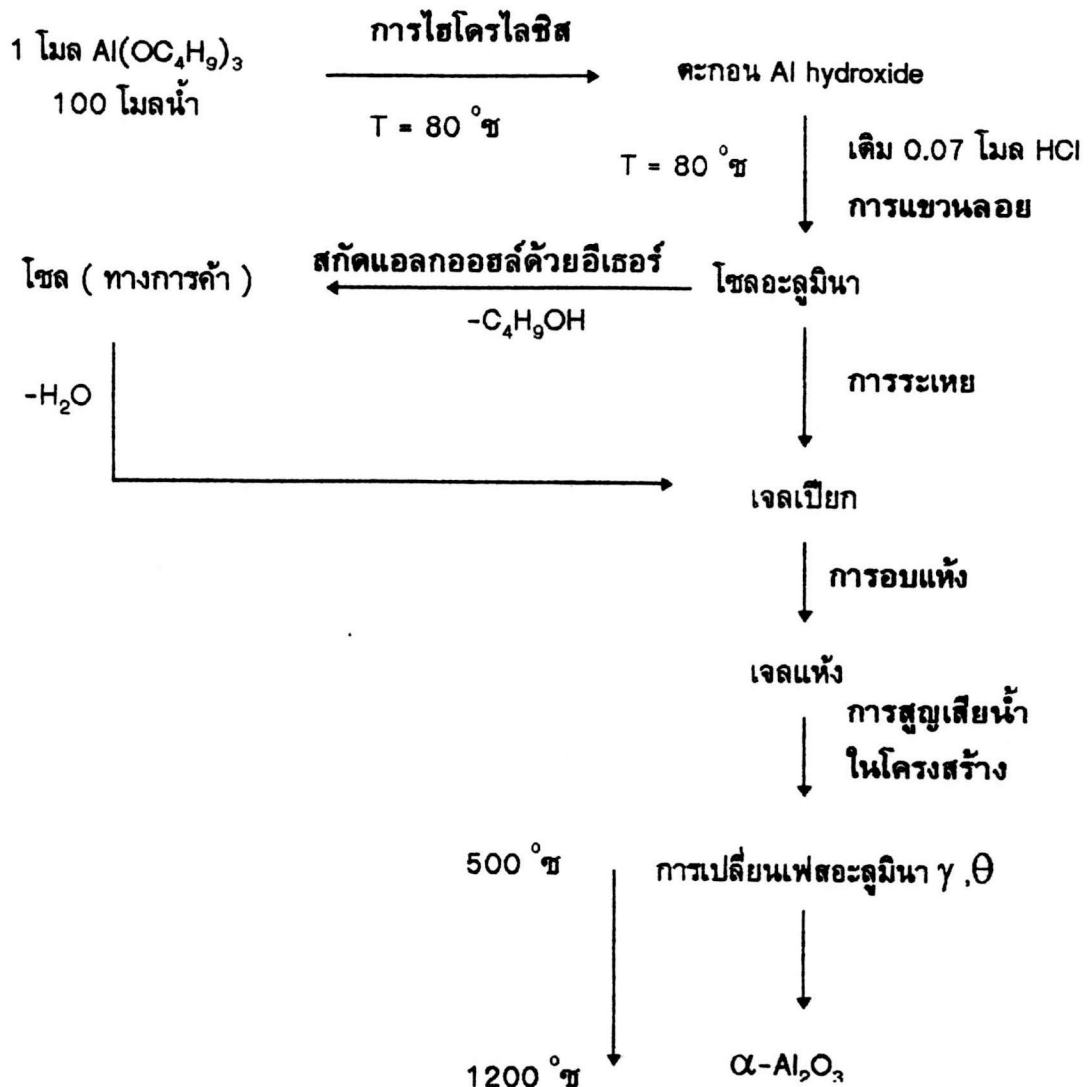
การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะได้เยื่อแผ่นที่มีความหนาประมาณ 5 ไมครอน เยื่อแผ่นที่เตรียมได้
ในบางครั้งอาจเกิดการแตก ดังนั้นจำเป็นต้องทำการเคลือบเยื่อแผ่นซ้ำอีกครั้ง

2. การกรอง วิธีนี้เป็นการใช้ความดันในการอัดสารละลายโซลผ่านผิวตัวรองรับ ทำให้
อนุภาคถูกกักไว้ที่ผิวหน้าตัวรองรับ ซึ่งคล้ายกับวิธีหล่อสลิต วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายโซล
ที่มีความเข้มข้นสูง

3. การเคลือบ เป็นกระบวนการจุ่มตัวรองรับลงในตัวทำละลายก่อน หลังจากนั้นค่อย
จุ่มตัวรองรับลงในสารละลายโซล แล้วจึงดึงตัวรองรับขึ้นจากสารละลายโซลด้วยความเร็วคงที่
เพื่อให้ได้ความหนาของเยื่อแผ่นสม่ำเสมอ วิธีนี้ทำให้สารละลายโซลติดบนตัวรองรับ เนื่องจาก
ความหนืดและแรงตึงผิว

เอกสารการวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมเยื่อแผ่น

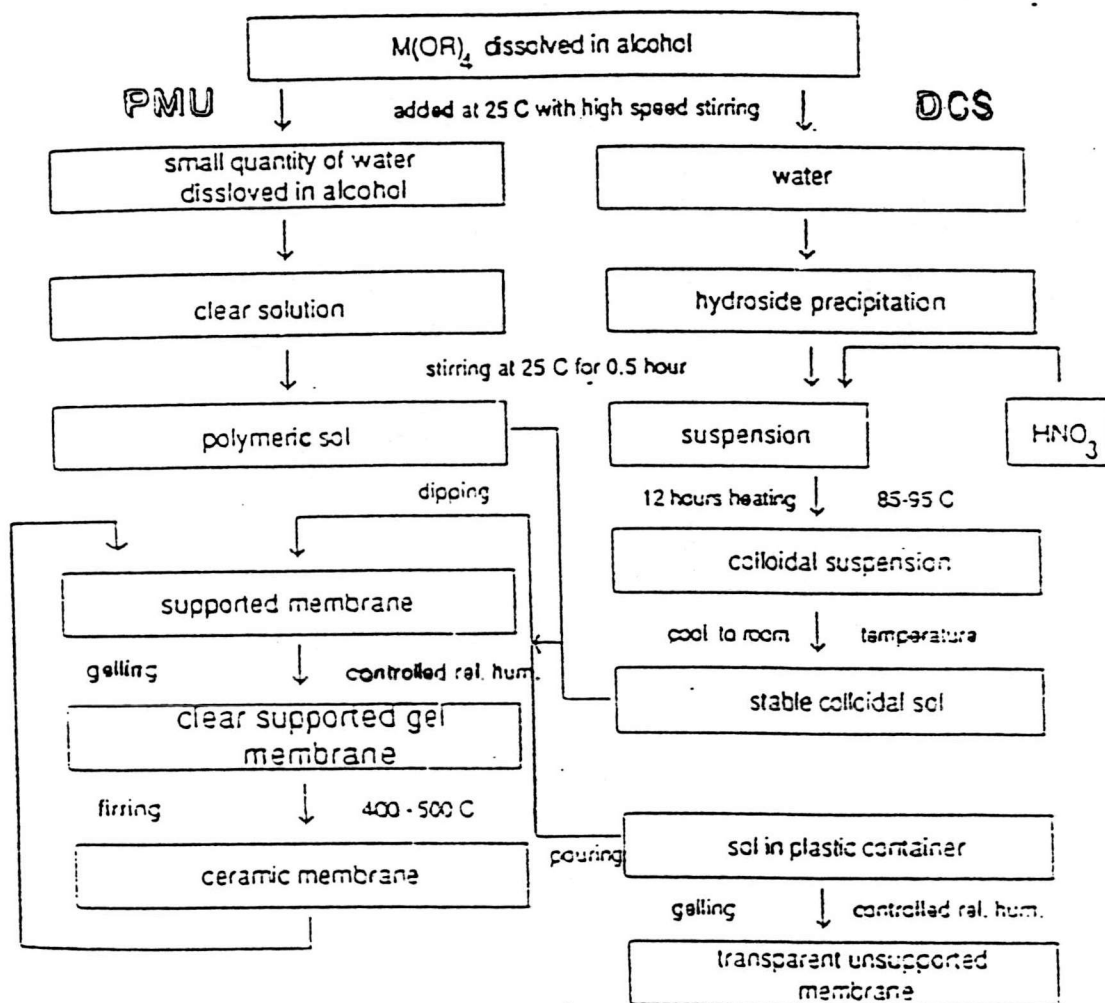
ในปี 1975 Yoldas (18) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิ
ต่อการสร้างโซลอะลูมินาจากโลหะแอลคอกไซด์ พบว่า ในการเตรียมโซลต้องเติมกรด
อย่างน้อย 0.03 โมลกรดต่อโมลแอลคอกไซด์ลงในสารละลายเพื่อให้เกิดการควบแน่นที่
สมบูรณ์ และ ถ้าใช้อัตราส่วนกรดต่อแอลคอกไซด์มากกว่า 0.1 โมลกรดต่อโมลแอลคอก
ไซด์ สารละลายที่ได้จะใส แต่เจลที่ได้จะเกิดการแตก ในระหว่างการเตรียมโซลโบรไมต์
พบว่าถ้าใช้น้ำเย็นในการทำปฏิกิริยากับแอลคอกไซด์ แล้วนำไปกลั่นกลับที่อุณหภูมิ
80 °ซ พบว่าโซลที่ได้คือ $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ในขณะที่เมื่อใช้น้ำร้อน (อุณหภูมิสูงกว่า 80 °ซ)
ในการทำปฏิกิริยากับแอลคอกไซด์ แล้วนำไปกลั่นกลับที่อุณหภูมิ 80 °ซ อัตราการควบ
แน่นเกิดได้เร็วและได้ผลึกของโบรไมต์ และถ้าใช้อุณหภูมิกลั่นกลับในช่วง 70 - 75 °ซ
อัตราการควบแน่นเกิดได้ช้าและได้โบรไมต์ชนิดออสถาน กระบวนการเตรียมโซลของ
Yoldas แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงกระบวนการเตรียมโซลของ Yoldas (18)

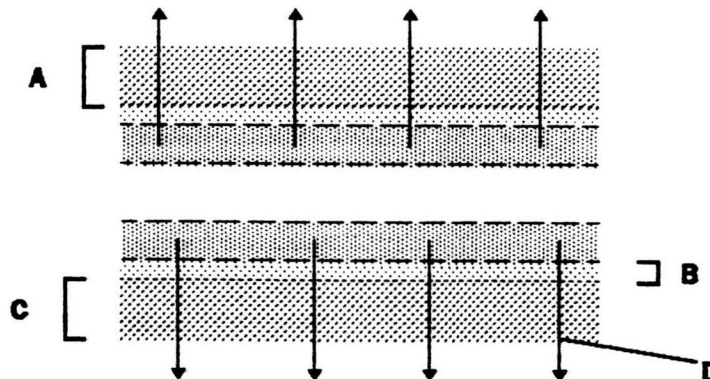
ในปี ค.ศ. 1985 Leenaars และ Burggaaf (19) ได้ศึกษาชนิดของกรดที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโซลและขนาดรูพรุนของตัวรองรับต่อการสร้างชั้นเยื่อแผ่น พบว่าเมื่อใช้ตัวรองรับที่มีขนาดรูพรุน 0.8 ไมครอน สารละลายโซลจำเป็นต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจะสามารถเกิดการสร้างชั้นเยื่อแผ่นบนตัวรองรับได้ ในขณะที่เมื่อใช้ตัวรองรับที่มีขนาดรูพรุน 0.12 ไมครอน สามารถใช้กรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริกในการเตรียมสารละลายโซล ซึ่งสามารถเกิดการสร้างชั้นเยื่อแผ่นได้เช่นเดียวกับใช้กรดไฮโดรคลอริก

ในปี ค.ศ. 1988 Anderson และคณะ (20) ได้เตรียมเยื่อเซรามิกไทเทเนียมและอะลูมินาด้วยวิธีไฮดรอ-เจลจากสารแอลคอกไซด์ โดยการไฮโดรไลซ์ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium tetra- isopropoxide) และอะลูมิเนียมเซกกันดารีบิวทอกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 เยื่อเซรามิกที่เตรียมได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ระหว่าง 18 - 50 อังสตรอม



รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการเตรียมเยื่อแผ่นไทเทเนียมและเยื่อแผ่นอะลูมินา (20)

ในปี ค.ศ. 1992 Yu และ Klein (21) ได้ทำการเตรียมเยื่อแผ่นอะลูมินาด้วยวิธีโซล-เจล เยื่อแผ่นเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมเซคกันดารีบิวทอกไซด์ (ASB) กับน้ำ โดยให้น้ำซึมผ่านตัวรองรับเพื่อไปทำปฏิกิริยากับ ASB ที่ผิวหน้าตัวรองรับ ทำให้เกิดเป็นชั้นเจลบางบนผิวตัวรองรับ การควบคุมอัตราการไฮโดรไลซิสทำได้โดยอาศัยการซึมของน้ำผ่านตัวรองรับ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบ คือ อัตราส่วนระหว่าง ASB:แอลกอฮอล์ เป็น 1:25 ระยะเวลาในการเคลือบอยู่ในช่วง 10 และ 15 วินาที และเวลาอบแห้งอยู่ระหว่าง 2.5 และ 3 นาที โดยระยะเวลาในการอบแห้งขึ้นกับปริมาณของน้ำที่ผ่านตัวรองรับ แล้วนำไปเผาที่ 800 °ซ พบว่า เยื่ออะลูมินาที่เตรียมได้ไม่เกิดการแตก ร้าวและเกาะติดกับตัวรองรับได้ดี



รูปที่ 2.11 แสดงการเตรียมเยื่อแผ่น เมื่อ A) เป็นสารละลาย ASB ในแอลกอฮอล์, B) เป็นตัวรองรับ , C) เป็นชั้นเจลที่เติบโต และ D) เป็นน้ำที่ซึมผ่านตัวรองรับ (21)

เอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับการกรอง

ในปี ค.ศ. 1987 Lafforgue และคณะ (22) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการกรองแบบตั้งฉากในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องเพื่อเพิ่มผลผลิตยีสต์ พบว่าในกระบวนการนี้สามารถผลิตยีสต์ได้ความเข้มข้นสูงสุด 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่ออัตราการป้อนสารอาหารต่อปริมาตรทั้งหมดเป็น 0.5 ชั่วโมง^{-1} ที่ความเข้มข้นกลูโคส 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เยื่อแผ่นเซรามิกที่ใช้ในการกรองคือ เยื่อแผ่นเซอร์โคเนียซึ่งเคลือบคาร์บอนไว้ที่ผิวมีขนาดรูพรุน 0.14 ไมโครเมตร

ในปี ค.ศ. 1989 เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ (23) ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องในการผลิตบิวทานอลจากเชื้อ *Clostridium acetobutylicum* ATCC824 โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถใช้อัตราการป้อนสารอาหารต่อปริมาตรถึงหมักได้สูงถึง $0.55 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$ ทำให้อัตราผลผลิตบิวทานอล 3.44 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

ในปี ค.ศ. 1993 Pradanos และคณะ (24) ได้ประยุกต์ใช้อุลตราฟิลเตรชันในการกรองแบบตั้งฉากเพื่อใช้แยกเอนไซม์อินเวอร์เทส (Invertase) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 270,000 โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกมีขนาดรูพรุน 20 นาโนเมตร และมีความพรุน 50 เปอร์เซ็นต์